

# Modellbasierte Schwingungsuntersuchung geklebter Chipaufbauten hinsichtlich ihrer Eignung zum Ultraschall-Drahtbonden

J. Panepinto\*, T. Dobs\*\*, A. Grams\*, J. Höfer\*, L. Helmich\*\*\*, M. Hunstig\*\*\*, Prof. K. D. Lang\*,\*\*

\*Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, Berlin

\*\*Technische Universität Berlin, Forschungsschwerpunkt Technologien der Mikroperipherik, Berlin

\*\*\*Hesse GmbH, Paderborn

Kurzfassung des Beitrags: **Gegenstand dieses Artikels ist die Untersuchung des Schwingungsverhaltens geklebter Siliziumchips. Eine gute Qualität von Ultraschall-Drahtbondverbindungen erfordert eine Mindeststeifigkeit des zu kontaktierenden Aufbaus. Diese Steifigkeit ergibt sich zunächst aus der Geometrie und den Werkstoffeigenschaften von Substrat-, Klebstoff- und Halbleitermaterial. Trifft nun aber die Ultraschallfrequenz des Bondgerätes eine Eigenfrequenz des Aufbaus, so können Resonanzeffekte auftreten, welche die wirksame Steifigkeit herabsetzen.**

Zur Beschreibung des Schwingungsverhaltens geklebter Chipaufbauten wurde ein Finite-Elementebasiertes Simulationsmodell entwickelt. Für die Modellvalidierung wurden zudem Schwingungsmessungen an realen Aufbauten durchgeführt.

Es wurde anhand eines Klebstoffs und verschiedener Schichtdicken gezeigt, wie diese sich auf das Schwingungsverhalten von Chipaufbauten auswirken. Im FE-Modell wurden dazu Resonanzfrequenzen und Schwingungsformen berechnet. Zur mechanischen Anregung von Testaufbauten wurden Piezokeramiken verwendet und die resultierenden Geschwindigkeitsamplituden mittels Laservibrometrie gemessen. Die Eigenfrequenzen und zugehörigen Verschiebungsamplituden der Aufbauten wurden mit den Simulationsergebnissen verglichen. Ziel ist die modellbasierte Beschreibung von unterschiedlich geklebten Chipaufbauten, um qualitative Aussagen über deren schwingungsmechanische Eignung zum Bonden treffen zu können.

## 1 Motivation

Für die Zuverlässigkeit erzeugter Bondverbindungen ist die Qualität der gesetzten Bondstellen von größter Bedeutung. Der physikalische Prozess des Bondvorganges ist hoch komplex und wird durch viele Parameter, etwa durch Prozessparameter, die Oberflächenreinheit oder die verwendete Materialpaarung, beeinflusst. Für einen qualitätsgerechten Bondvorgang muss außerdem der Untergrund – also das System Chip, Klebstoff und Substrat – der Bewegung des Bondtools genügend Steifigkeit entgegensetzen, damit die Ultraschallenergie in die Bondstelle einkoppeln kann. Die wirksame Steifigkeit des Untergrunds kann dabei deutlich herabgesetzt sein, wenn der Aufbau Resonanzeffekte im Bereich der Bondfrequenz aufweist. Die daraus resultierenden schlechten Kontaktierungen führen zu schnellerem Versagen einer Verbindung und senken damit die Zuverlässigkeit einer gesamten Baugruppe. Um ein Verständnis für diese Effekte zu erhalten, wird im Folgenden die Finite-Elemente-Modellierung verwendet und deren Ergebnisse werden durch einen speziellen Messstand validiert.

## 2 Modellierung

### A. Probengeometrie und Materialien

Zur Geometrie des untersuchten Aufbaus gehören ein Substrat, ein Chip und der beide Komponenten verbindende Klebstoff (siehe Bild 1). Da der Einfluss der dünnen Chipmetallisierung auf das Schwingungsverhalten unbedeutend ist, wird sie bei der Modellierung vernachlässigt (1 µm Dicke zu 200 µm des Chips oder 1000 µm des Substrats). Chip und Substrat werden als unstrukturiert angenommen. Die Kantenlänge des Chips beträgt 3 mm, die des Substrats 20 mm.



Bild 1. Komponenten des Versuchsaufbaus

Als Chipmaterial wird reines Silizium und für das Substrat in Hinblick auf die Vibrationsmessungen, zu denen später ein Abgleich erfolgt, eine Piezokeramik verwendet. Die Keramik ermöglicht eine breitbandige Anregung im hohen Frequenzbereich, welche im Abschnitt 3 diskutiert wird. Der verwendete Klebstoff Semicosil® 989/1K ist mit einer bei der Kommunikation mit dem Hersteller angegebenen Steifigkeit von 6 MPa sehr nachgiebig.

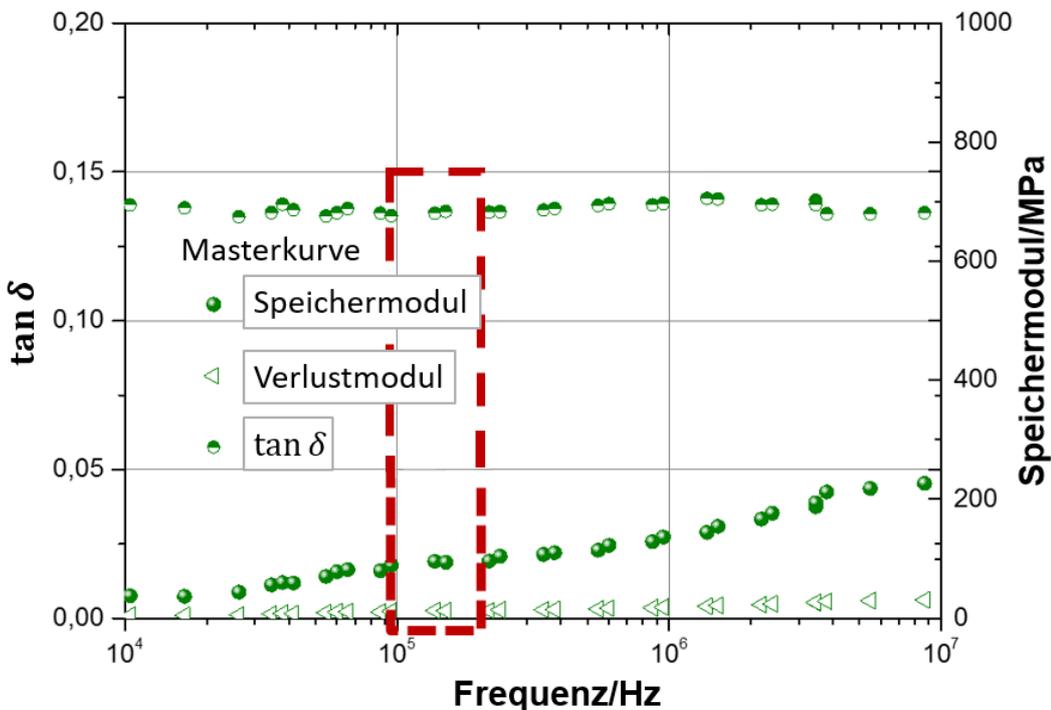
Um den Einfluss unterschiedlicher Klebstoffdicken eruieren zu können, wurde in einer Versuchsreihe nur diese variiert. Es wurden drei verschiedene, übliche Schichtdicken eingestellt. Aufgrund von Fertigungstoleranzen ergeben sich die in der Tabelle 1 dargestellten schwankenden Schichtdicken, die an den Testaufbauten gemessen und im Modell umgesetzt wurden.

**Tabelle 1. Die Klebstoffdicken des Aufbaus, gemessen an den vier Ecken der Chips**

Ecke	Aufbau S1 Klebstoffdicke [µm]	Aufbau S2 Klebstoffdicke [µm]	Aufbau S3 Klebstoffdicke [µm]
1	30	88	148
2	26	84	153
3	33	79	148
4	29	73	153

*B. Materialparameter*

Im Folgenden werden die erforderlichen Materialkennwerte zur numerischen Berechnung des Schwingungsverhaltens des in Bild 1 dargestellten Aufbaus angegeben. Hierzu gehören neben der Dichte  $\rho$  und dem Dämpfungsgrad  $\xi$  der Elastizitätsmodul  $E$  und die Poissonsahl  $\nu$ . Der Dämpfungsgrad und der E-Modul für den Klebstoff wurden mit Hilfe der Dynamisch Mechanischen Analyse (DMA) frequenzabhängig bestimmt. Die Steifigkeit ist über die beim Bondprozess auftretenden Ultraschallfrequenzen nahezu konstant und liegt damit deutlich über dem für Raumtemperatur und quasistatische Belastung angegebenen Wert des Herstellers. In Bild 2 ist dieses Phänomen anhand des Speichermoduls, eine bei viskoelastischen Materialien steifigkeitsäquivalenten Größe, dargestellt.



**Bild 2. Die extrapolierten Größen der DMA im typischen Bondbereich von  $10^5$ - $10^6$  Hz**

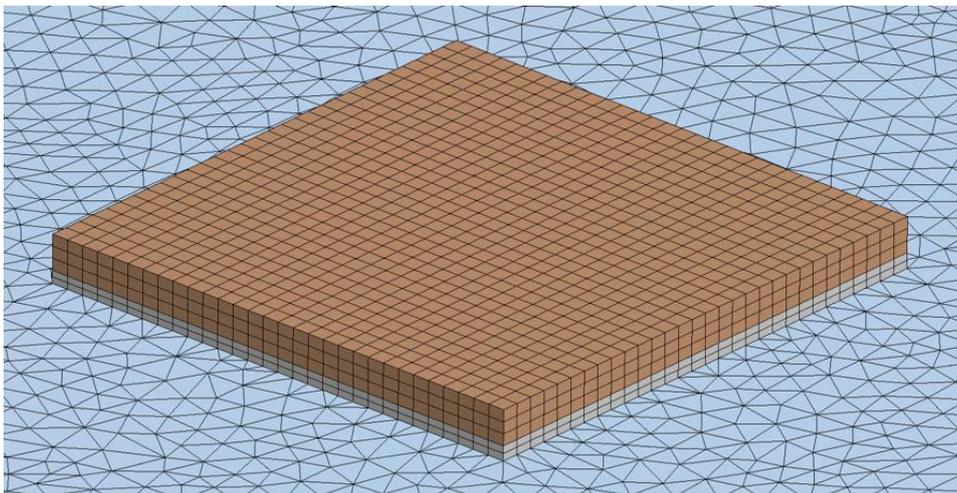
Tabelle 3 fasst alle implementierten Parameter zusammen. Die mit \* gekennzeichneten Werte entstammten aus eigenen Messungen.

**Tabelle 3. Materialkennwerte der verwendeten Materialien, unter Berücksichtigung der Raumorientierung (X,Y,Z) oder Ebene (XY,YZ,XZ)**

Material	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Dämpfungsgrad [-]	E-Modul [GPa]	Poissons-zahl [-]
Silizium	2,3 [1]	0,020 [2]	X: 169 [1] Y: 169 [1] Z: 130 [1]	XY: 0,06 [1] YZ: 0,36 [1] XZ: 0,28 [1]
Piezokeramik (Blei-Zirkonat-Titanat PIC 255)	7,8 [3]	0,018*	66,00 [3]	0,34 [4]
Klebstoff Semicosil ® 989/1K	1,1 [5]	0,069*	0,09*	0,35

### C. Das parametrisierte FE-Modell

Abb. 3 zeigt den Aufbau des Simulationsmodells, der mit der Simulationssoftware *Ansys 18.1* erstellt wurde. Die geometrischen Größen sind parametrisch, sodass z.B. die Klebstoffdicke variiert werden kann. Bei der Erstellung des FE-Netzes wurden ausschließlich Hexaeder-Elemente für die Chip- und Klebstoffgeometrie mit mindestens zwei Elementschichten verwendet, wohingegen das Substrat mit einer Kombination von Hexa- und Tetraeder-Elementen vernetzt wurde. Ein Augenmerk lag dabei auf gleichmäßigen Proportionen der Elementkantenlängen. Das Model enthält etwa 65000 Elemente mit quadratischen Ansatzfunktionen und ermöglicht eine präzise Lösung mit geringem numerischen Aufwand.



**Bild 3.** FE-Netz von Chip und Klebstoff in Anbindung an die Piezokeramik

### D. Randbedingungen und Anregung einer harmonischen Analyse

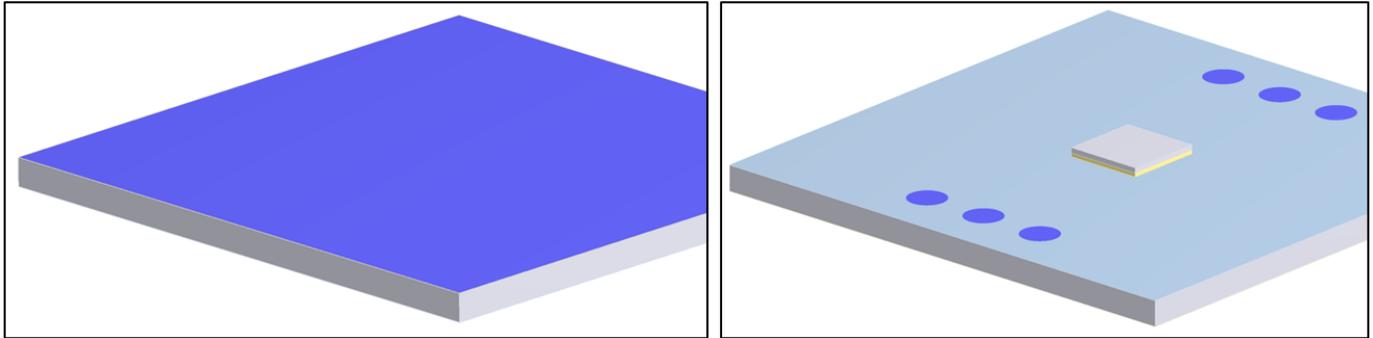
Das Schwingungsverhalten einer Struktur bei Anregung mit variablen Frequenzen lässt sich gut durch die harmonische Analyse abbilden. Die Berechnung bedient sich der Annahme, dass auf ein eine Anregung mit einem harmonischen Schwingungssignal eine harmonische Antwort resultiert. Neben diesem Schwingungssignal müssen mechanische Randbedingungen definiert werden, durch welche der Aufbau realitätsnah gelagert wird. Dabei werden zwei Ansätze verfolgt:

I.) Die Substratgrundfläche wird vollständig fixiert sowie die Substratoberseite durch sogenannte Federkontaktstifte gelagert. In einer statischen Analyse wurde die durch die Kontaktstifte induzierte Vorspannung berechnet und für die nachfolgende harmonische Analyse berücksichtigt. Der Vorteil dieser Lagerung liegt bei der Isolierung der chip-spezifischen Moden. Der gesamte Aufbau wird mit einer frei gewählten konstanten Schwingungsamplitude gleichwertig angeregt.

II.) Die Keramikunterseite kann sich nur nach oben bewegen, also von der Unterlage abheben, diese aber nicht durchdringen. Des Weiteren wird die Keramik im Versuchsaufbau durch Federkontaktstifte nach unten gehalten. Die Auflageflächen dieser Federkontaktstifte wurden ebenfalls als Lagerung definiert. Diese Lagerung ist elastisch

und bedient sich der Federsteifigkeit aus dem Datenblatt der Kontaktstifte [6]. Diese Randbedingungen bilden besser die in Abschnitt 3 vorgestellte Halterung des realen Aufbaus ab. Das Eingangssignal erfolgt durch eine frei gewählte Anregung der Piezokeramik in vertikaler Richtung (orthogonal zur Chipoberfläche) an den Elementknoten der Unterseite.

In Bild 4 sind die jeweiligen Flächen, auf denen die beschriebenen Randbedingungen definiert wurden, dargestellt.

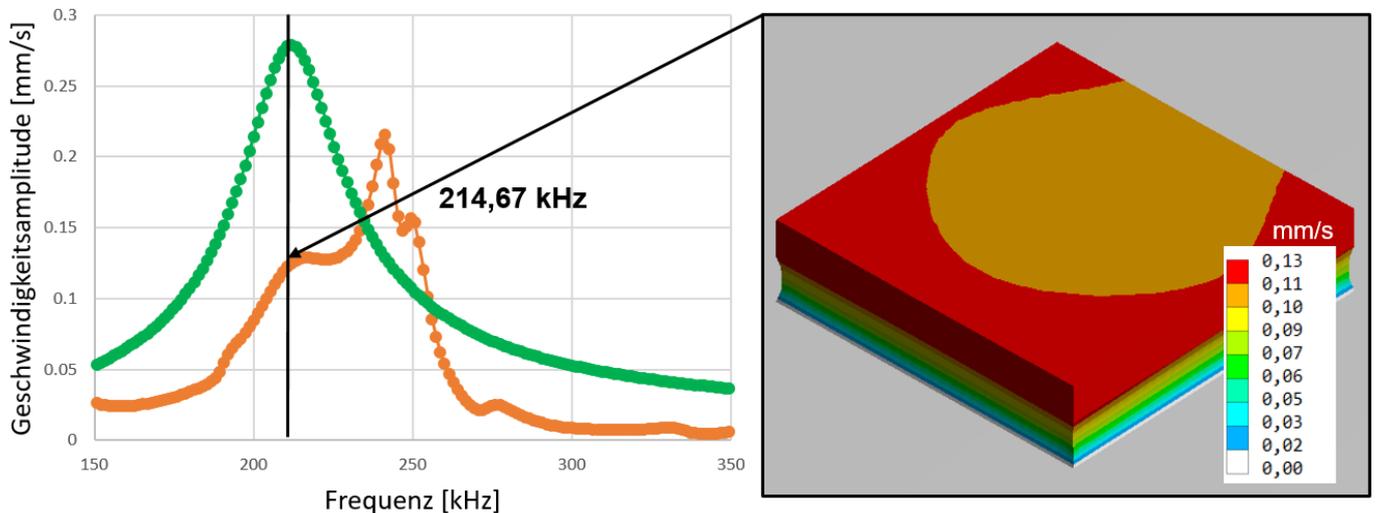


**Bild 4.** Randbedingungen an Unterseite (links) und Oberseite (rechts) des Substrates

### E. Ergebnisse der Harmonischen Analyse

Im Folgenden sind die berechneten Frequenzgänge für die am realen Aufbau S3 gemessenen Klebstoffdicken exemplarisch dargestellt (Bild 5). Dabei entspricht die grüne Kurve der Simulation mit Randbedingung I.) und die orange der mit Randbedingung II.). Bei der grünen Kurve ergibt sich ein eindeutiges Maximum bei Resonanzfrequenz. Die zugehörige Schwingungsform entspricht einer Auf- und Abbewegung von Chip und Klebstoff und ist neben den Graphen abgebildet. Grau dargestellte Bereiche haben eine Geschwindigkeit nahe 0 m/s. Die Verformungen sind zur besseren Erkennbarkeit stark überhöht dargestellt. Die Frequenz liegt auch bei diesem Aufbau (mit der größten Klebstoffdicke) jenseits üblicher Bondfrequenzen. Geringere Eigenfrequenzen treten z.B. bei dickeren Klebstoffschichten oder größeren Halbleitern auf.

Für die orange Kurve ist die Interpretation des Frequenzganges schwieriger. Zwar ist der Peak der chipeigenen Mode noch leicht erkennbar und entspricht ebenfalls einem Tauchen des Chips/Klebstoffs, allerdings überwiegt eine substrateigene Mode, welche durch die Randbedingung II.) begünstigt wird. Diese bildet gleichzeitig das Maximum im Frequenzspektrum.



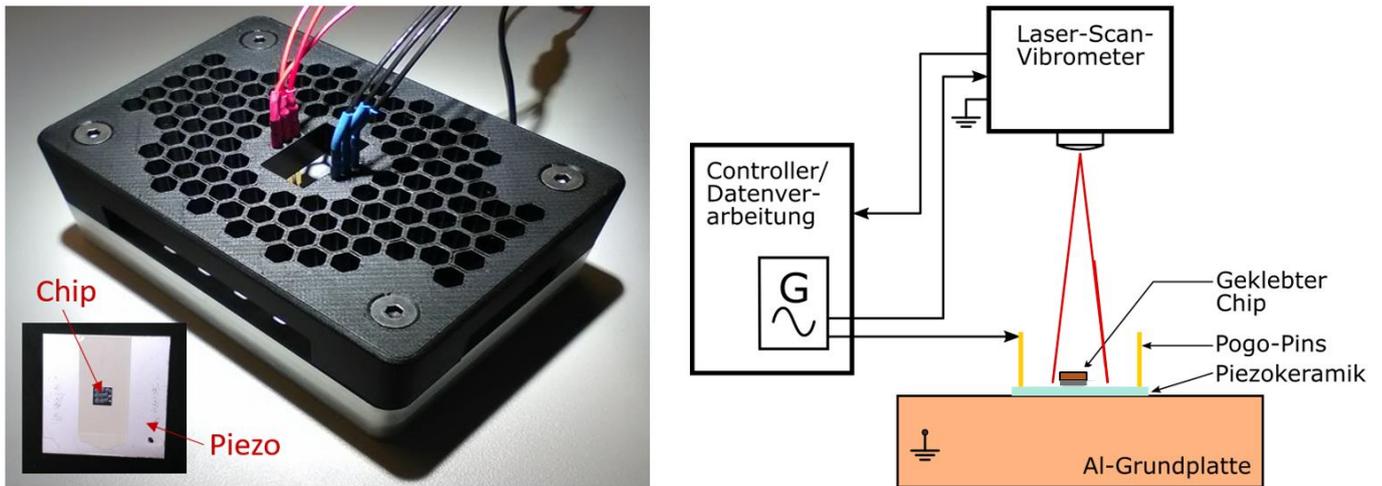
**Bild 5.** Simulativ ermittelte Frequenzgänge des Aufbaus S3 bei zwei Kombinationen von Randbedingungen I.) und II.) und die zugehörige Schwingform bei Resonanzfrequenz des Chips, die Geschwindigkeitsamplituden sind auf eine sinnvolle Größenordnung skaliert

## 3 Experimentelle Validierung

### A. Messaufbau

In Bild 6 ist die Halterung für die Piezokeramik-Testsubstrate dargestellt. Die Keramik wird durch Federstifte in einer Kunststoffform (Material: ABS, schwarz) auf eine Aluminium-Grundplatte gedrückt und dadurch gleichzeitig

elektrisch kontaktiert. Durch Anlegen einer Wechselspannung wird die Keramik in Vertikalrichtung angeregt und der geklebte Chip zum Schwingen gebracht. Durch ein Laser-Scanning-Vibrometer wird die Geschwindigkeit eines Messpunktes auf der Chipoberfläche gemessen. Wird an mehreren Punkten nacheinander gemessen, kann über die Korrelation der Phase die Schwingungsform der gescannten Fläche abgebildet werden.



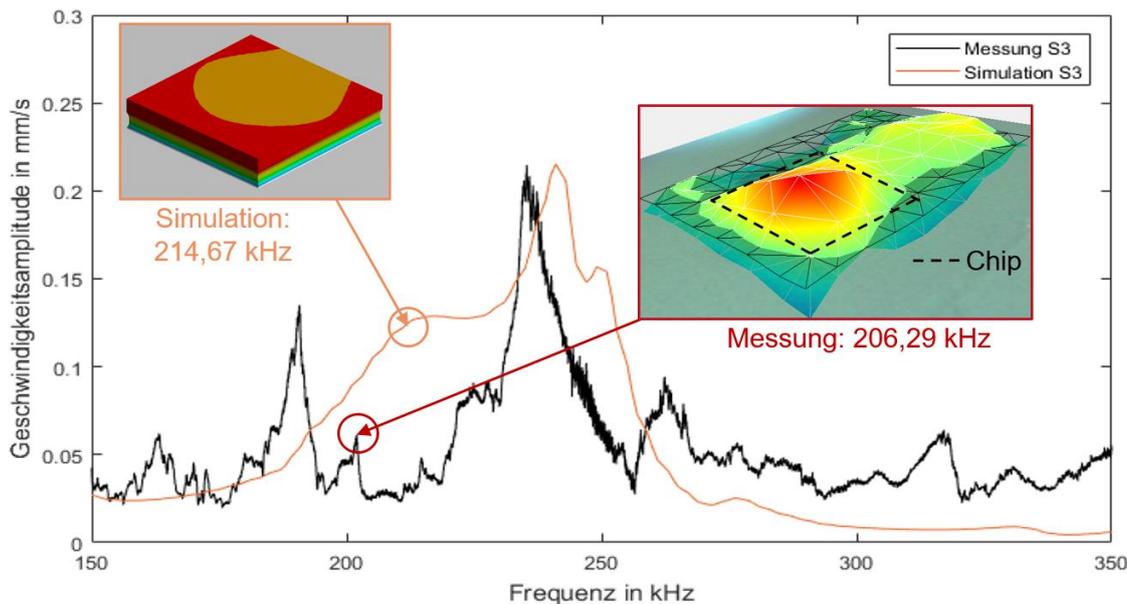
**Bild 6.** Halterung zur Einspannung und elektrischen Kontaktierung der Testaufbauten (links) sowie schematischer Versuchsaufbau (rechts)

### B. Eingangssignal und Abtastrate

Ziel der messtechnischen Untersuchungen war die Darstellung eines Frequenzgangs für verschiedene Chipaufbauten. Mit Hilfe einer schnellen Fourier-Transformation (FFT) des Geschwindigkeitssignals als Reaktion auf eine Anregung lassen sich die Maximalamplituden des Signals im Frequenzspektrum bestimmen. Die Piezokeramik wurde mit einem durch den Generator erzeugten Chirpsignal angeregt. Diese Signalform ermöglicht die Anregung des Aufbaus mit einer Vielzahl von aufeinanderfolgenden Frequenzen. Als Abtastrate wurde eine Frequenz von  $f_{Ab} = 1,56 \text{ MHz}$  gewählt, welche deutlich über der erwarteten maximalen Resonanzfrequenz der Aufbauten von unter 500 kHz liegt und das Nyquist-Kriterium erfüllt.

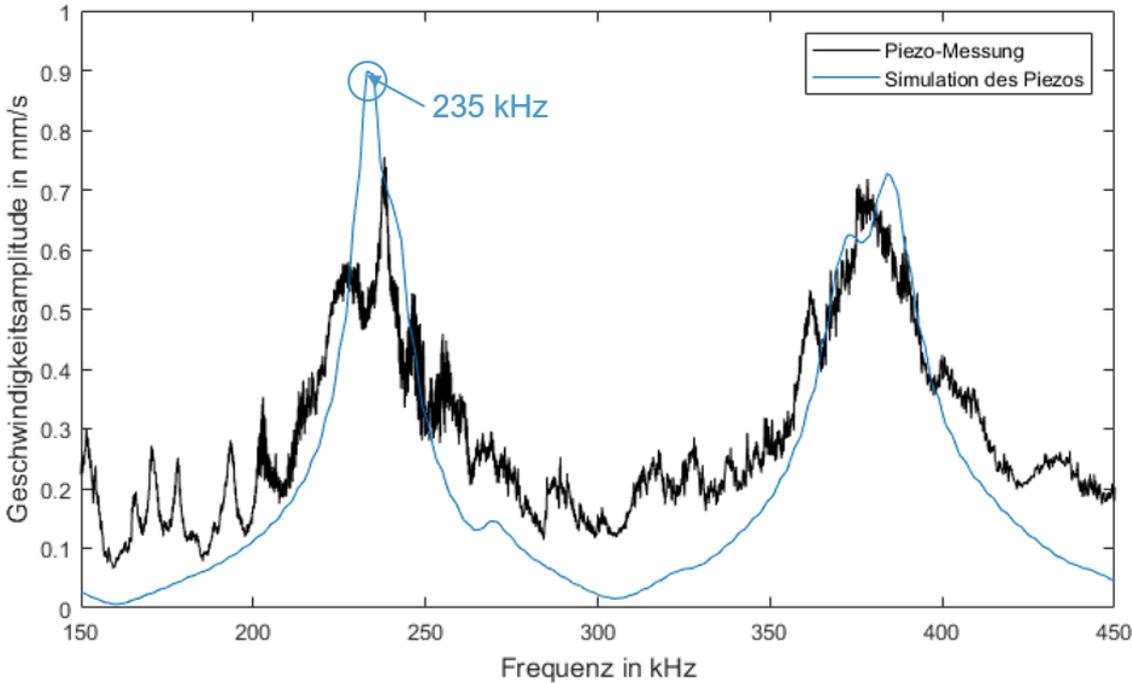
## 4 Ergebnisse und Korrelation

Der Frequenzgang im Bereich der zu erwartenden Eigenmode für Aufbau S3 wurde mittels Laservibrometrie gemessen und ist der Kurve der Simulation mit Randbedingung II.) in Bild 7 gegenübergestellt. Die Geschwindigkeitskurven aus dem Modell wurden für den qualitativen Vergleich auf die Messwerte skaliert, da die Anregungsgeschwindigkeit der Piezokeramik nicht bekannt war. An diesem Beispiel ist zu erkennen, dass in der Simulation wie in der Messung die chip-eigene Mode schwer anhand des Frequenzgangs zu erkennen ist.



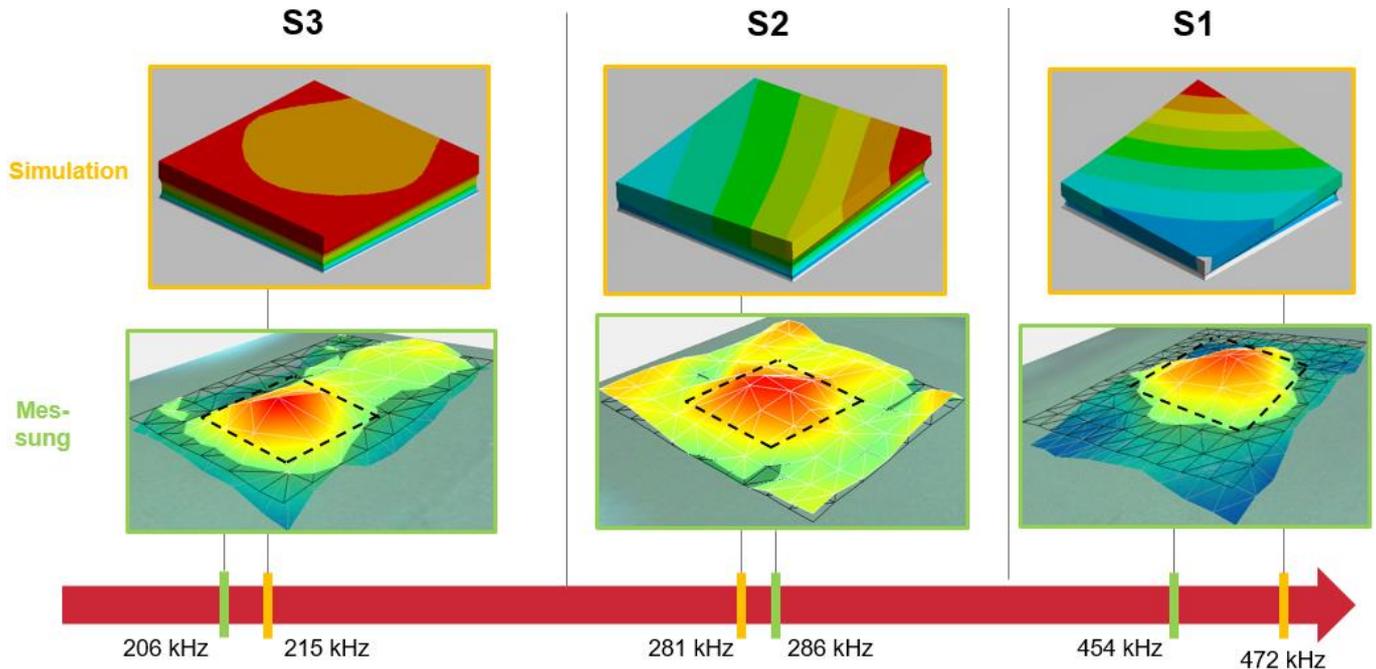
**Bild 7.** Frequenzgänge von Messung und Simulation bei Aufbau S3

Das globale Maximum bildet in beiden Kurven eine substrateigene Mode, wie in Bild 8 bei der Betrachtung des Substrates ohne den Chipaufbau zu erkennen ist. Hier zeigen Simulation und Messung sehr ähnliche Verläufe.



**Bild 8.** Vergleich von Messung und Simulation der Geschwindigkeitsamplituden auf dem Substrat

Nachfolgend sind in Bild 9 die Ergebnisse für die chipeigenen Schwingmoden zusammengestellt, wobei die Schwingungsformen aus Simulation und Messung für die jeweiligen Aufbauten kenntlich gemacht wurden.



**Bild 9.** Auftretende Moden von Klebstoff und Chip

Es ist zu erkennen, dass die ermittelten Resonanzfrequenzen der Simulation dicht an denen der Messung liegen (Abweichung für Aufbau S3: 4,4%, S2: 1,7% und S1: 4,0%). Grund für Abweichungen können nicht erfasste Toleranzen bei den Chip- und Substratabmaßen sein, wie z.B. die Chipdicke, aber auch die Lage der Einspannung. Sind z.B. die Federpins in der Simulation symmetrisch angeordnet, war die Anordnung bei der Messung nicht exakt symmetrisch aufgrund händischen Einlegens der Proben. Was allerdings deutlich zu erkennen ist, ist die Versteifung des Aufbaus bei geringeren Klebstoffdicken, wodurch die Resonanzfrequenzen steigen.

## 5 Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Abhängigkeit von Resonanzfrequenzen und zugehörigen Schwingungsformen weichgeklebter Chipaufbauten von unterschiedlichen Klebstoffdicken gezeigt. Dabei treten chipeigene (ausschließliche Schwingung des Chips und Klebstoffs) und substrateigene (vorwiegende Schwingformen des Keramiksubstrates) Schwingformen auf. Durch das vorgestellte Simulationsmodell lassen sich weich geklebte Chipaufbauten qualitativ gut beschreiben und können somit Aussagen über deren Schwingungsverhalten beim Bondvorgang getroffen werden.

Weitere Untersuchungen könnten die Optimierung der Geometrie und der hier stark vereinfachten Randbedingungen des Simulationsmodells beinhalten, welche sich auf das Schwingungsbild auswirken. Außerdem wäre die Betrachtung von Aufbauten mit Anregung in horizontaler Richtung von Interesse, um weitere für den Bondprozess relevante Moden zu identifizieren.

Die Modellierung der Schwingungseigenschaften weichgeklebter Chipaufbauten kann künftig helfen, resonanzbedingte Beeinträchtigungen beim Bondvorgang zu identifizieren oder zu vermeiden.

### Schrifttum

- [1] Matthew A. Hopcroft, William D. Nix, Thomas W. Kenny: What is the Young's Modulus of Silicon? JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, VOL. 19, NO. 2, APRIL 2010.
- [2] CADFEM GmbH: Dämpfung in Festkörpern. Seminarunterlagen, Modul 3, 2016.
- [3] Piezo Systems, Inc.: Keramik Typ 5A4E.
- [4] PI Piceramic GmbH: Piezokeramische Materialien und Bauelemente. Schulungsunterlagen, 07.12.2016.
- [5] Wacker Chemie AG: SEMICOSIL® 989/1K, Technical data sheet. Version: 1.4 / Date of last alteration: 10.11.2014.
- [6] Conrad: PTR 1025-C-1.5N-AU-1.5 Präzisions-Prüfstift für Leiterplattenprüfung, Federkontakt. <https://www.conrad.de/de/ptr-1025-c-15n-au-15-praezisions-pruefstift-fuer-leiterplattenpruefung-federkontakt-737264.html>. [Online; Stand 23. November 2017]